

# FLOTA DE VEHÍCULOS AÉREOS PARA FOTOGRAFIA DE ALTA RESOLUCIÓN EN APLICACIONES DE AGRICULTURA DE PRECISION. PROYECTO RHEA

Jaime del Cerro, David Sanz, João Valente, Claudio Rossi, Leandro Cancar, Antonio Barrientos,  
Centro de Automática y Robótica CAR UPM-CSIC  
C/ José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid  
[j.cerro@upm.es](mailto:j.cerro@upm.es)

## Resumen

*El proyecto RHEA se basa en la cooperación entre vehículos autónomos de tierra y aire con el objetivo de realizar ciertas tareas asociadas al ámbito de la agricultura de precisión. En concreto, la eliminación selectiva de malas hierbas a partir de su identificación basada en fotografía aérea de alta resolución y baja altura. El objetivo del presente trabajo es el de describir la flota de vehículos aéreos encargados de la adquisición de las imágenes, tanto desde el punto de vista de las unidades específicamente desarrolladas para este proyecto como de la aplicación software desarrollada para tal efecto.*

**Palabras Clave:** Agricultura de precisión, Vehículos aéreos no tripulados, UAV, Aerial Coverage Path Planning, RHEA

## 1 INTRODUCCION

El proyecto europeo RHEA “Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and Forestry Management [3] ha sido desarrollado bajo el séptimo programa marco de la Comisión Europea identificado como NMP-CP-IP 245986-2 y su objetivo ha sido el diseño, desarrollo y validación de una nueva generación de sistemas robóticos para el tratamiento de malas hierbas en cultivos, aplicando tanto técnicas mecánicas como térmicas, junto a la utilización precisa de herbicidas.

El proyecto cubre gran variedad de cultivos típicos de la agricultura europea, que van desde cultivos como el tomate, maíz, fresas, girasoles y algodón de , con cultivo (wide crop) como cereales de invierno y cebada. En cuanto a árboles, el proyecto RHEA aborda tanto los de hoja perenne como nogales, almendros, olivos como los cultivos genéricos para la obtención de maderas y bosques.

El objetivo del proyecto RHEA es reducir en un 75% el uso de productos químicos, mejorando la calidad del cultivo así como la seguridad y salud para los seres humanos. Adicionalmente, esto supone una reducción en el coste de cosecha, directamente debido al ahorro de los consumibles. Para ello utiliza una flota de pequeños robots heterogéneos equipados con sistemas sensoriales avanzados y manipuladores o herramientas que ejecutan sobre el terreno las decisiones de avanzados algoritmos.

Como previamente se ha mencionado, la clave del proyecto está en la cooperación de vehículos de tierra y vehículos aéreos integrados en una flota para la gestión integral de los tratamientos. Así, el sistema demostrador se compone de dos vehículos aéreos y tres tractores de pequeñas dimensiones basados en plataformas comerciales a los que se le añaden elementos actuadores para tratamientos químicos, térmicos y mecánicos.

En concreto, en este trabajo se presenta la aportación de los vehículos aéreos, cuya misión es la de realizar fotografías aéreas de gran resolución y baja altura, que son utilizadas para realizar un mosaico geo-referenciado del terreno completo a tratar. A partir de esta imagen completa del terreno, un grupo de expertos en teledetección y agricultura de precisión detectan los rodales de malas hierbas, determinando con precisión su posición que es transmitida a un planificador específicamente desarrollado para la flota de vehículos terrestres que se encarga de determinar las misiones específicas para cada uno de ellos, con objeto de exterminar las malas hierbas sin dañar el cultivo.

Todo el proceso, desde la determinación del área de acción o cultivo a tratar, la parametrización de la misión y planificación aérea se realizan en el computador de la estación base. En dicho computador se puede realizar una simulación previa de la misión y monitorizar su ejecución real

tras la validación. Dicho computador también se utiliza para la gestión de los vehículos terrestres, desde la planificación de misión, simulación y supervisión, tras ejecutar los algoritmos de detección de malas hierbas.

En la sección 2 se recoge una descripción de los vehículos aéreos utilizados. En la sección 3 se expone el procedimiento para definición y planificación de la misión aérea con varios vehículos. La sección 4 describe la estructura de control y monitorización de la flota. Finalmente, la sección 5 muestra los resultados alcanzados y analiza el cumplimiento de los requerimientos previamente establecidos por la tarea a desarrollar.

## 2 VEHICULOS AEREOS EN EL PROYECTO RHEA

Los vehículos aéreos que están encargados de realizar la misión de imagen aérea han sido específicamente desarrollados por la compañía alemana AirRobot [1], comercializados bajo la denominación AR200 (ver Figura 1).

Las unidades son vehículos multi-rotor, que con una capacidad de carga de 1,5 kg disponen de una autonomía de vuelo superior a los cuarenta minutos. Su estructura mide 2,2m de diámetro y tienen un peso de 4,5 kg. Disponen de un enlace de datos digital para la monitorización y control de la misión en tiempo real. Dado el tamaño elevado de las unidades para el transporte por parte de una persona, disponen de una configuración de transporte basada en un sistema de plegado de las patas tipo sombrilla, consiguiendo así que se requiera de un reducido espacio para su almacenamiento y transporte hasta el campo de vuelo y un rápido despliegue de las unidades, a las que tan solo hay que añadir las palas, mediante un ensamble rápido, e introducir la batería para estar totalmente operativas.

Uno de los factores críticos en el uso de los vehículos aéreos es la seguridad. En este sentido, el hecho de disponer de seis rotores de alta calidad confiere al sistema de un alto grado de confiabilidad. Adicionalmente proporciona redundancia a un sistema ya de por si muy estable, ya que el sistema es capaz de aterrizar sin problemas en caso de fallo de uno de sus motores lo que reduce enormemente el riesgo de accidente, que puede tener importantes repercusiones económicas, no solo por el coste del vehículo y de su carga, sino también por el riesgo de daño potencial a personas o terceros.



Figura 1. Unidades aéreas proyecto RHEA. AirRobot AR-200.

El sistema de percepción está compuesto por dos cámaras Sigma modelo Merrill DP2 que capturan imágenes de 4800 x 3200 x 3 componentes, dotadas de ópticas de alta calidad y control totalmente manual. A una de las dos cámaras se le retira el filtro NIR (Near-Infra-Red). Las cámaras se instalan mediante un sistema de acople rápido en las unidades aéreas. El sistema se estabiliza por gravedad en dirección vertical al suelo (Figura 2), esto requiere que el vehículo aéreo esté totalmente estable en el momento de la captura de la imagen pero garantiza la verticalidad de la imagen aérea. El tiempo de grabación de la imagen en la tarjeta interna de la cámara es cercano a los seis segundos.



Figura 2. Sistema de detección remota de los vehículos aéreos.

Los vehículos disponen de capacidad de navegación definiendo una serie de puntos de paso (Way-Point navigation). En dichos puntos de paso el sistema de control de los vehículos puede realizar acciones sobre la carga de pago, como por ejemplo toma de medidas o disparo de una cámara. Por lo tanto, la parte principal del programa de vuelo simplemente consiste en generar una lista ordenada de puntos donde los vehículos tienen que tomar las fotografías, asegurándose un tiempo de parada en cada uno de ellos suficiente para la estabilización del sistema mecánico de anclaje de las cámaras y que el tiempo transcurrido entre dos puntos de paso es superior al tiempo requerido por la cámara para almacenar las imágenes en su tarjeta.

Si bien la operativa de los vehículos es totalmente autónoma en cuanto a la navegación a través de los puntos de paso, por motivos de seguridad y de acuerdo a las legislaciones emergentes relacionadas

con la operación de vehículos aéreos no tripulados, el sistema requiere de un operador que supervisa la misión. Así, el despegue y aterrizaje se realizan mediante ordenes que proporciona el operador de cada una de ellas utilizando un equipo de comunicaciones y el mando remoto denominado BKS mostrado en la Figura 3. Este modo de control semiautónomo incrementa la seguridad en dichas maniobras, especialmente en el aterrizaje, ya que el vehículo no dispone de sensores de proximidad y la distancia libre al suelo, con las cámaras instaladas, es muy reducida, lo que supondría que cualquier error en el posicionamiento GPS podría causar aterrizar sobre alguna pequeña piedra o montículo de tierra que podría dañar el sistema de visión.

La única situación en la que se permite el aterrizaje autónomo de las unidades es cuando se activa un estado de emergencia debido a que la batería ha alcanzado un nivel crítico o bien el vehículo ha traspasado, por algún motivo, las fronteras de seguridad impuestas por el operador.



Figura 3. BKS para el control y supervisión por parte del operador del vehículo aéreo.

Tras la finalización de la misión, las imágenes capturadas son traspasadas al computador de la estación base, utilizando las tarjetas de memoria internas de las cámaras.

### 3 DEFINICIÓN Y PLANIFICACIÓN DE LA MISIÓN AEREA

Se describe a continuación el proceso de definición de la misión a ser desarrollada por los vehículos aéreos.

Como primer paso, el operador debe indicar el contorno del campo de interés mediante el uso de la interfaz gráfica en la estación base. Para ello puede definir una polilínea de un número cualquiera de segmentos definiendo así un polígono con cualquier forma. Cada vértice de la polilínea se define por tres coordenadas UTM (Universal Transversal Mercator Coordinates). Adicionalmente, el operador debe definir dos tipos de contornos de seguridad. El primero activará una alarma cuando el vehículo traspasase dicho contorno, avisando al operador de tal circunstancia, el segundo conllevaría otra alarma y una maniobra de aterrizaje preventivo como medida de seguridad. La definición de dichos contornos se ve afectada por áreas sobre las cuales no se debe volar bajo ninguna circunstancia, como por ejemplo carreteras o edificios.

El sistema permite definir el número de unidades aéreas disponibles para la realización de la misión, que si bien el número disponible en el proyecto es dos, los algoritmos desarrollados son genéricos admitiendo cualquier otro valor. La utilización de varios vehículos de forma simultánea permite reducir la variación en los niveles de iluminación producidos por tiempos prolongados de misión cuando los terrenos son muy grandes. Obviamente no presenta ninguna ventaja cuando los campos de cultivo son de reducido tamaño. Teniendo en cuenta el tiempo de vuelo máximo de las unidades aéreas utilizadas, de 40 minutos, el uso de dos unidades permitiría cubrir campos de grandes extensiones con un solo vuelo simultáneo.

Para el reparto de áreas entre ambos vehículos se han desarrollado varios algoritmos, que permiten distribuir la tarea de forma no homogénea (un vehículo podría tener un nivel de batería diferente del otro por ejemplo). No obstante los condicionantes de seguridad en la misión han conducido a una solución básica pero efectiva que será detallada más adelante en esta misma sección.

La mayoría de los requerimientos se establecen a partir de la resolución espacial requerida para el reconocimiento de las malas hierbas. Durante las pruebas este valor se ha establecido en 1 o 2 píxeles por centímetro. Este valor unido al valor de la distancia focal de las cámaras (30mm) y tamaño de los sensores (23.5x15.7 mm) determina que cada imagen tiene un tamaño real sobre el suelo de 48x32 metros, lo que obliga a unas alturas de vuelo cercanos a los 60 metros, obtenidas mediante la aplicación de la siguiente relación:

$$Height = FocalLength \left( \frac{RealSize}{SensorSize} \right) \quad (1)$$



Adicionalmente se debe establecer un porcentaje de solape (overlapping) entre las fotografías, con objeto de minorar el efecto de los errores en el posicionamiento GPS de los vehículos (usan un sistema de posicionamiento GPS simple no diferencial por reducción de peso), de los errores en el control (la posición real no es exactamente la deseada) y de las pequeñas divergencias en los ángulos de guiñada y alabeo de las cámaras (no perfectamente verticales). Adicionalmente, puesto que la técnica de mosaico desarrollada en el proyecto permite la reconstrucción tridimensional del terreno, es necesario que todos los puntos del terreno aparezcan en dos fotografías anexas, requiriéndose por todo ello un elevado porcentaje de solapamiento, trabajándose con un valor del 60%. Este valor reduce la distancia entre puntos centrales de las imágenes a 19 metros aproximadamente para obtener resoluciones de 1 pixel/cm.

Considerando estos parámetros, la discretización del campo de cultivo se realiza mediante la implantación de una matriz de puntos separados 19 metros. La orientación de esta matriz se estudia detalladamente en [7]. Un algoritmo computa los puntos de la matriz en los que es necesario tomar una fotografía y en cuales no, en función de la forma del campo (algunos de ellos deberán estar fuera del campo para obtener el solapamiento requerido) tal y como ilustra la Figura 4. Dicha figura muestra un ejemplo de un campo definido por cinco vértices sobre el que se aplica una discretización y selección de puntos donde es necesario adquirir imágenes y donde no.

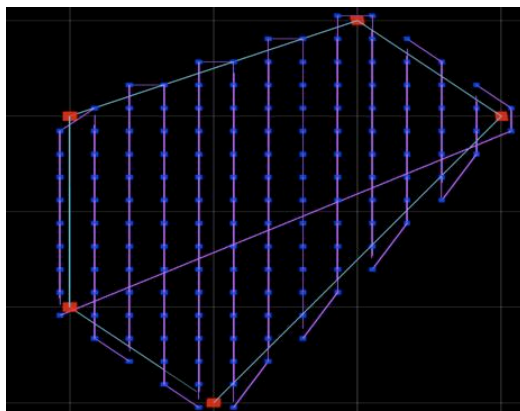


Figura 4. Ejemplo de discretización de campo de cultivo genérico.

Al igual que en el caso de repartición de áreas entre los vehículos, el algoritmo que finalmente se ha utilizado para definir las trayectorias que unen los puntos de paso se ha elegido teniendo en consideración de la seguridad de la misión. Por ello, los vehículos solo realizan movimientos simples de avance y retroceso a lo largo de las filas o columnas de la matriz (cubriendo únicamente los puntos de paso necesarios). Estas trayectorias son simples de

intuir por los operadores que supervisan el sistema, detectando rápidamente cualquier anomalía. La elección de este algoritmo permite el reparto de zonas simplemente dividiendo la trayectoria total entre el número de vehículos, considerando únicamente filas o columnas completas. De esta forma, se garantiza que nunca dos vehículos se encuentran en la misma fila o columna, permaneciendo distanciados de una forma uniforme a lo largo de la misión, comenzando siempre desde el punto mas cercano al de despegue. La forma del campo influye también en determinar si se realizan las misiones describiendo filas o columnas, eligiendo la opción que maximiza la distancia entre los vehículos, que habitualmente coincide con la dimensión inferior de la matriz.

El algoritmo planificador ha sido codificado usando C++ permitiendo compilación multiplataforma. En el proyecto se ha utilizado una versión bajo Windows 7, coincidiendo con todas las aplicaciones alojadas en el computador de la estación base.

#### 4 EJECUCION DE LA MISION Y MONITORIZACION

La estructura y secuencia de gestión de las misiones aéreas se muestran en la Figura 5, que adicionalmente incluye los módulos software principales o bloques que están involucrados en el proceso. Esta sección está dedicada a la descripción de dichos módulos desde un punto de vista funcional.

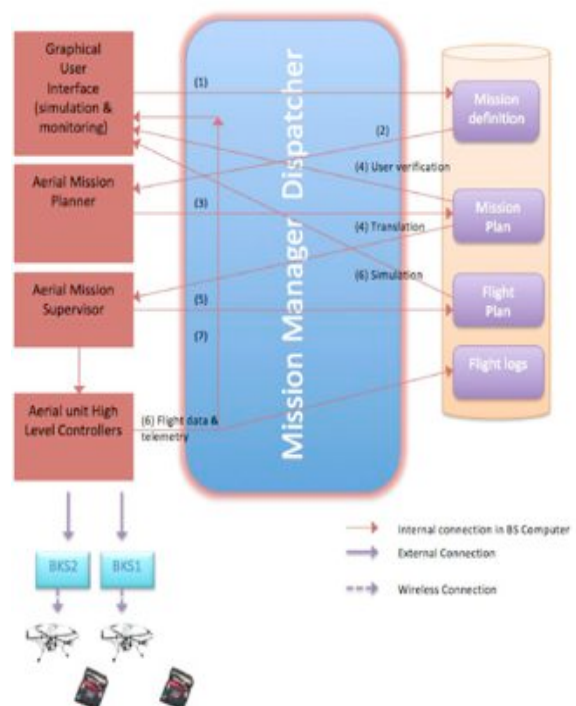


Figura 5. Secuencia de la Misión Aérea.

## 4.1 INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

El primer bloque involucrado es la interfaz gráfica de usuario o GUI (Graphical User Interface). Este módulo ha sido desarrollado por Cyberbotics Ltd, usando el simulador robótico Webots7 [2]. Esta aplicación no solo tiene funcionalidades clásicas como definición de misión o monitorización de telemetría y alarmas, sino que permite la simulación de los vehículos aéreos y terrestres de forma previa a la ejecución de sus misiones, con objeto de validar las planificaciones. Los parámetros de los vehículos y del sistema de percepción (parámetros de cámaras, etc.) así como la definición de la misión (definición de campos de cultivo y áreas de seguridad) se almacenan en la base de datos del sistema permitiendo así utilizar diferentes configuraciones de una forma ágil o repetir anteriores inspecciones.

Una vez que la misión ha sido definida, el usuario puede ejecutar la planificación aérea para obtener las trayectorias para la flota de acuerdo a las especificaciones detalladas en la sección 3 de este trabajo. En este paso, un fichero que contiene el plan de misión es creado. Dicho plan contiene las trayectorias para el número de drones elegidos por el usuario. Estas trayectorias son presentadas por el módulo GUI para validación mediante impresión sobre la imagen aérea del terreno de las zonas correspondientes a las fotografías a realizar y comprobando que parámetros, como el solapamiento, son correctos.

El plan de misión que tiene un formato genérico (lista de puntos de paso) para cualquier tipo de vehículo aéreo. Por lo tanto, el segundo paso es la generación de los planes de vuelo en función de los protocolos de los vehículos a utilizar. En el proyecto RHEA correspondiente a los formatos y expresiones del protocolo establecido por AirRobot. Tras esta fase de codificación, se crean los planes de vuelo que bien pueden ser simulados utilizando el módulo GUI (ver Figura 6) o directamente transmitidos al supervisor de misión para su ejecución sobre los drones reales.

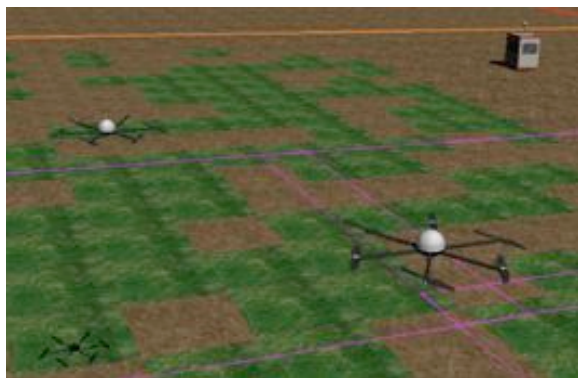


Figura 6. Vista de la simulación de la misión aérea.

## 4.2 SUPERVISOR DE MISION AEREA

Si el operador de la estación base considera que los resultados obtenidos en la simulación son adecuados, el supervisor se encarga de descargar los planes de vuelo a los vehículos, a través del módulo de control de alto nivel AUHLC (Aerial Unit High Level Control) que a su vez los comunica a los vehículos mediante conexiones USB con los módulos BKS. Las comunicaciones entre los módulos de la estación de tierra como el supervisor de misión o el AUHLC se realizan mediante sockets utilizando un módulo gestor y coordinador de todas las comunicaciones.

El supervisor aéreo es el módulo encargado de vigilar el estado de los vehículos y de la misión, gestionando las alarmas que pudiesen producirse en los vehículos o en el desarrollo de la misión y presentándolos al operador de la flota a través de la GUI. Este módulo es el encargado de la detección de problemas tales como un excesivo retraso en la ejecución de la misión, un tiempo excesivo en alcanzar un punto de paso o el control de los niveles de baterías, etc.,

Adicionalmente, el módulo supervisor es el encargado de comunicar los comandos de control de misión recibidos a través de la GUI, gestionando los comandos enviados a los vehículos de una forma adecuada, como por ejemplo pausar una misión (manteniendo los vehículos en vuelo estacionario en la posición en la que se encontraban en el momento de la orden), continuarla desde el punto en que se encuentren, reiniciarla o cancelarla, lo que supone que los vehículos regresan autónomamente a la vertical del punto de despegue

Como se ha mencionado anteriormente, el despegue y aterrizaje se realiza mediante ordenes del operador del vehículo. Así, tras enviar las misiones a los vehículos, el operador debe dar la orden de despegue a los drones, mediante comandos de velocidad vertical, controlando su posición con comandos de velocidad frontal y lateral. Una vez alcanzada la altura indicada en el protocolo de actuación, el operador de misión desde la estación base puede dar la orden de comienzo de misión que es transmitida a las unidades para el comienzo de la ejecución de sus respectivos planes de vuelo. Los operadores de los vehículos pueden en cualquier momento tomar el control de una forma preferente ante el plan de vuelo establecido, interrumpiendo así la misión.

## 4.3 CONTROL DE ALTO NIVEL

Como se ha mencionado anteriormente, los drones implementan un control de bajo nivel que permite la navegación definida por puntos de paso, lo que

supone un control de actitud y velocidad implementados sobre el sistema de control embarcado.

Por encima de este nivel de control, y alojado en el computador de la estación de tierra se encuentra un módulo por cada unidad aérea denominado sistema de control de alto nivel, implementado en C++ bajo el sistema operativo del computador, en este caso Windows 7. Un proceso gestiona la comunicación con cada unidad aérea de una forma independiente. Este módulo está encargado entre otras cosas de las conversiones de formato en las posiciones, ya que el proyecto RHEA utiliza formato UTM y los drones de AirRobot el formato terrestre (longitud-latitud). No obstante, su misión principal es la traducción de las comunicaciones de las unidades aéreas bajo protocolo propietario de su diseñador a un lenguaje genérico. Esta característica permitiría integrar vehículos aéreos diferentes, considerándose este módulo como middleware o capa intermedia. Esta capa de abstracción incluye también el nivel físico, así los vehículos utilizados en el proyecto RHEA se comunican mediante conexiones USB a través de sus módulos BKS, que adicionalmente permiten la recepción de señal de video que puede ser incorporada a la estación de tierra mediante una simple capturadora y que permitiría de esa forma al operador de misión ver lo que está sobrevolando cada unidad en cada momento.

### 4.3 GESTOR DE COMUNICACIONES Y MISION

De acuerdo a lo mostrado en la Figura 5 todas las comunicaciones dentro del sistema RHEA son gestionados por éste módulo (Mission Manager Dispatcher). Implementado como una macro-maquina de estados, es el encargado de supervisar el desarrollo de la misión.

## 5 RESULTADOS

Un proyecto como el RHEA ha requerido numerosas y variadas integraciones. Desde la inicial, que tenía como objetivo únicamente aspectos físicos (tamaños, pesos, alimentaciones, conectores) a nivel subsistema (vehículo o estación base), como las finales, que integraban la completa funcionalidad del proyecto.

Otro aspecto que a considerar es que las integraciones y pruebas debían sincronizarse temporalmente con los cultivos, por lo que fue necesario realizar pruebas con cereales de invierno (que tuvo lugar en el mes de Enero de 2014) y otra posterior en Mayo de 2014. No obstante, desde el punto de vista de misión aérea, no había diferencia alguna. Todas las pruebas se realizaron en terrenos gestionados agrariamente por el ICA (Instituto de Técnicas Agrarias del CSIC) en Arganda del Rey (Madrid).

A continuación se muestran los planes de vuelo sobre los campos de cultivo mediante la utilización de dos vehículos AR-200 y algunas imágenes ilustrativas tomadas durante las pruebas. En la Figura 7, en el campo de la parte superior correspondiente a las pruebas de Mayo, solo se pueden mostrar los planes de vuelo, ya que las nuevas políticas vigentes en España desde el primer semestre del 2014, impidieron la obtención del correspondiente permiso de la agencia Española para la seguridad aérea AESA para realizar los vuelos. En la parte inferior, se representa en color blanco la posición de los drones y en colores amarillo y verde la planificación realizada para las pruebas con cereal de invierno, demostración de Enero de 2014.



Figura 7. Planes de vuelo y trayectorias reales seguidas por las unidades en las demostraciones del proyecto RHEA



Figura 8. Vehículos aéreos antes de comienzo de la misión. Se pueden observar también dos tractores de la flota y la estación de tierra.

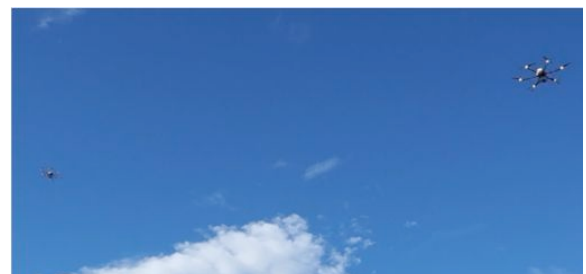


Figura 9. Realización de la misión por parte de los vehículos aéreos.

Un video completo de la demostración está accesible en el sitio web del proyecto RHEA (4).



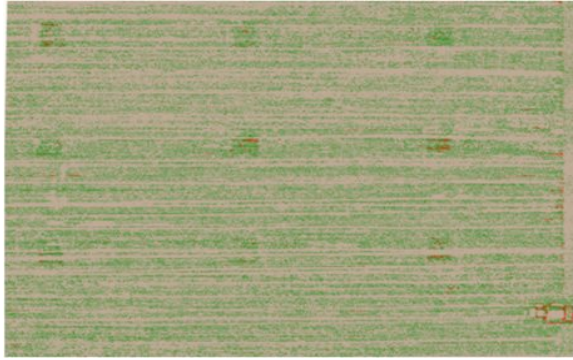


Figura 10. Resultado mosaico para detección de rodales de mala hierba.

A., De Frutos, M.A., (2013) "Near-optimal coverage trajectories for image mosaicing using a mini quadrotor over irregularshaped fields. Precision Agriculture 14(1), pp. 115–132

[7] Valente J, Del Cerro, J., Barrientos, A., (2013) "What is the optimal stitching orientation from an aerial survey perspective?", Second International Conference on Robotics and associated High-technologies and Equipment for Agriculture and forestry, pp. 449-457

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado por el grupo de Robótica y Cibernética del Centro de Automática y Robótica UPM-CSIC a través de su participación en el proyecto Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and Forestry Management", (RHEA) financiado por el Séptimo Programa Marco de la Comisión Europea (NMPCP-IP 245986-2 RHEA). Los autores agradecen a todos los socios del proyecto su colaboración. Asimismo han contribuido a su desarrollo el proyecto ROBOCITY2030, financiado por la Comunidad de Madrid (S-0505/DPI/000235) y el proyecto ROTOS del plan nacional, a través del ministerio de Ministerio de Economía y Competitividad (DPI 2010-17998).

### Referencias

- [1] AIR ROBOT Website, <http://www.airrobot.de>
- [2] Barrientos, A., Colorado, J., Cerro, J., Martinez, A., Rossi, C., Sanz, D., Valente, J, (2011) "Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots", Journal of Field Robotics 28(5), pp 667–689
- [3] Cyberbotics Website, <http://www.cyberbotics.com>
- [4] RHEA project Website, <http://www.rhea-project.eu>
- [5] Valente, J., Barrientos, A., Del Cerro, J., (2013) "Optimization of Aerial Surveys using an Algorithm Inspired in Musicians Improvisation." In: 23rd International Conference on Automated Planning and Scheduling, Rome
- [6] Valente, J., Sanz, D., Del Cerro, J., Barrientos,